

# کاربرد الگوریتم انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی

حسین صادقی<sup>۱</sup>، مهدی ذوالفقاری<sup>۲</sup>، حسین سهرابی<sup>۳\*</sup>، یونس سلمانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۱/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۱/۰۴/۱۸

## چکیده:

مدیریت تقاضای انرژی از اهمیت فراوانی در برنامه‌ریزی و تامین امنیت اقتصادی کشورها برخوردار است. شناسایی عوامل موثر بر روند تقاضای انرژی کشور و پیش‌بینی مصرف آن می‌تواند به سیاست‌گذاران و فعالان در بازار انرژی در جهت تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و بهبود عملکرد بازار و تامین امنیت سوخت کشور کمک کند.

امروزه روش‌های نوینی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف ابداع گشته است که در میان این روش‌ها الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱</sup> جایگاه ویژه‌ای دارند. در میان الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> و الگوریتم بهینه‌یابی انبوه ذرات<sup>۳</sup> از جمله شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در علوم مختلف می‌باشند. از این رو، در این مطالعه برای تخمین و پیش‌بینی روند تقاضای انرژی کشور از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات در قالب دو الگوی خطی و نمایی استفاده شده و کارایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است و با استفاده از کاراترین الگو و روش و بر اساس سناریوهای مختلف، روند آبی تقاضای انرژی کشور تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شده است.

نتایج مطالعه نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای الگوی نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بوده است. همچنین نتایج مطالعه نشان می‌دهد که کارایی الگوهای خطی برآورد شده با استفاده از هر دو الگوریتم تفاوت محسوسی ندارند. با این حال، بررسی نتایج الگوها و روش‌های مختلف برآورد شده کارایی و دقت بالای الگوی نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات را تأیید می‌کند.

## کلمات کلیدی:

تقاضا، انرژی، پیش‌بینی، الگوریتم انبوه ذرات، الگوریتم ژنتیک

(۱) استادیار دانشگاه تربیت مدرس

(۲) دانشجوی دکتری اقتصاد انرژی دانشگاه تربیت مدرس

(۳\*) دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

Sohrabivafa@gmail.com

1) Evolutionary Algorithm

2) Genetic Algorithm

3) Particle Swarm Optimization

## مقدمه

امروزه مدیریت تقاضا از جمله تقاضای انرژی نقش مهمی در برنامه‌ریزی کشورها دارد و از سوی دیگر، انرژی در تأمین امنیت اقتصادی نقش اساسی دارد و به عنوان یکی از عوامل تولیدی در کلیه بخش‌های اقتصاد به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در فرایند تولید نقش دارد. همچنین با اجرای برنامه‌های توسعه و روند صنعتی شدن کشور و ازدیاد جمعیت، افزایش نیاز به حامل‌های انرژی پررنگ‌تر گشته است. در سال‌های گذشته فراوانی ذخایر نفتی کشور و سیاست‌های تأمین حامل‌های انرژی ارزان موجب انرژی بر بودن بخش‌های مختلف اقتصاد گشته است تا جایی که تولیدات داخلی حامل‌های انرژی (سوخت تولید شده در داخل کشور) در مواردی جوابگوی مصرف داخلی نبوده و بخشی از منابع ارزی کشور صرف واردات سوخت می‌گردد [۳]. لذا هر گونه سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری در حوزه انرژی مستلزم بررسی روند تقاضای انرژی و عوامل موثر بر آن است. بنابراین، شناخت تقاضای انرژی کشور و پیش‌بینی روند آتی آن در کنار دیگر سیاست‌های حاکم بر تقاضای انرژی می‌تواند نقش موثری در فرایند تصمیم‌گیری‌های اقتصادی داشته باشد.

معمولاً در مطالعات مختلفی که جهت بررسی تقاضای انرژی مورد نیاز یک کشور انجام می‌شود، از شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی (جمعیت، تولید ناخالص داخلی و صادرات و واردات کالا و خدمات) برای توضیح روند تقاضای انرژی کل کشور استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷ و ۱۸]. با توجه به این نکته که روند این متغیرها در طول زمان در نوسان است، مدل‌های غیر خطی می‌توانند تخمین دقیق‌تری از تابع تقاضای انرژی را حاصل کنند. از سویی، مشکلات روش‌های کلاسیک در پیدا کردن ضرائب بهینه مدل‌های غیر خطی جایگاه خاصی را به روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت داده است. همچنین افزایش روزافزون سرعت محاسبات رایانه‌ای، طراحی بهینه پارامترها در مسایل گوناگون را از طریق شبیه‌سازی هوش جمعی<sup>۱</sup>، امکان‌پذیر کرده است. امروزه روش‌های برنامه‌نویسی تکاملی<sup>۲</sup> به روش‌های بهینه‌سازی در زمینه طراحی مدل‌های غیرخطی جایگاه خاصی داده است [۴].

در میان روش‌های برنامه‌نویسی الهام گرفته شده از طبیعت، الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات جایگاه خاصی دارد و در مطالعات متعددی با استفاده از این روش‌های برنامه‌نویسی قدرتمند به صورت مستقل، به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی پرداخته شده و هر یک بر توانایی این روش‌ها تاکید داشته‌اند. اما تاکنون این دو روش به صورت منسجم در یک مطالعه واحد مورد استفاده واقع نشده‌اند تا بتوان در مورد توانایی هر یک در مواجهه با یک مسأله خاص (شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی) به قضاوت پرداخت. از طرفی، متغیرهای اثرگذار بر شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی روندی غیرخطی داشته و همواره در نوسان می‌باشند و از سوی دیگر، به دلیل اینکه شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی در

1) Swarm Intelligence

2) Evolutionary Computing

زمینه سیاست‌گذاری‌های اقتصادی، رفاه و انرژی مسأله‌ای مهم و ضروری محسوب می‌شود، دستیابی به تکنیکی قدرتمند با توانایی‌های بالا و خطای کم در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی یکی از مسائل مورد توجه محققین و سیاست‌گذاران درگیر با مسائل انرژی می‌باشد. از این رو، در این مطالعه به بررسی و مقایسه کارایی الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برای تخمین و پیش‌بینی روند تقاضای انرژی کل کشور با استفاده از شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی در قالب الگوهای خطی و نمایی پرداخته شده است.

مطالعه حاضر در شش بخش تنظیم شده است؛ در بخش دوم مختصری از مطالعات انجام شده در حوزه تقاضای انرژی و در بخش سوم مبانی نظری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم انبوه ذرات و تابع شایستگی ارائه شده است. در بخش چهارم، ضمن ارائه الگوهای تحت بررسی، ارزش پارامترهای هر یک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برآورد شده است. در بخش پنجم، روند مصرف انرژی با استفاده از الگوها و روش‌های مختلف پیش‌بینی شده و کارایی آنها با توجه به روند واقعی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته و سپس با تدوین سناریوهای مختلف روند مصرف انرژی کل کشور تا سال ۱۴۰۴ با استفاده از کاراترین الگو و روش پیش‌بینی شده و در نهایت در بخش ششم، نتایج تجربی مطالعه ارائه شده است.

### پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه تقاضای انرژی با استفاده از تکنیک‌های نوین انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

قنبری، خضری و اعظمی (۱۳۸۷) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک به شبیه‌سازی تقاضای انرژی بخش حمل‌ونقل پرداخته و با استفاده متغیرهای توضیحی؛ جمعیت، تولید ناخالص داخلی، مسافت طی شده توسط خودروها و ارزش تجمعی تعداد خودروهای تولیدی و وارداتی، وضعیت آبی تقاضای انرژی در حمل و نقل را تا سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی کرده‌اند.

صادقی و ذوالفقاری (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی تقاضای بنزین در بخش حمل‌ونقل از الگوریتم ژنتیک در قالب توابع خطی، نمایی و درجه دو استفاده کرده و تقاضای بنزین را تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی کرده‌اند.

میبدی، خضری و اعظمی (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تقاضای انرژی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات پرداخته و با بهره‌گیری از خط سیر شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی به پیش‌بینی تقاضای انرژی تا سال ۱۳۹۶ پرداخته‌اند.

پاکسوی<sup>۱</sup> و دیگران (۲۰۱۱) در مقاله‌ای به تخمین تابع تقاضای انرژی ترکیه با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات پرداخته و تقاضای آتی انرژی ترکیه را تا سال ۲۰۲۴ پیش بینی کرده‌اند.

آنلر<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات به تخمین ارزش آتی تقاضای انرژی ترکیه تا سال ۲۰۲۵ پرداخته است.

کانیرت و اوزترک<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با عنوان سه مدل کاربردی تکنیک های جستجوی الگوریتم ژنتیک در تخمین تقاضای انرژی، به منظور برآورد تقاضای نفت با استفاده از روش بهینه یابی الگوریتم ژنتیک، با هدف تخمین ارزش آتی تقاضا برای نفت، به ارائه ی سه مدل غیر خطی تقاضا برای نفت در ترکیه پرداخته اند.

سیلان و اوزتورک<sup>۴</sup> (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای تقاضای انرژی ترکیه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر اساس شاخص‌های اقتصادی تخمین زده و تحت سناریوهای مختلف تا سال ۲۰۲۵ مصرف انرژی ترکیه را پیش بینی کرده‌اند.

تکساری<sup>۵</sup> (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها<sup>۶</sup> برای تخمین تقاضای انرژی ترکیه به منظور برآورد تقاضای انرژی ترکیه به ارائه توابع خطی و درجه دو تقاضای انرژی در این کشور پرداخته و تقاضای آتی انرژی را تا سال ۲۰۲۵ پیش بینی کرده است.

ووچیم و روپر<sup>۷</sup> (۲۰۰۹) در مقاله‌ای با عنوان تخمین تقاضای انرژی کره جنوبی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از متغیرهای توضیحی؛ جمعیت، تولید ناخالص داخلی، واردات و صادرات و طراحی یک شبکه عصبی پس‌خور<sup>۸</sup> تقاضای انرژی را تخمین و تحت چهار سناریو تقاضای آتی انرژی کره جنوبی را تا سال ۲۰۲۵ پیش بینی کرده‌اند.

هالدنبیلن و سیلان<sup>۹</sup> (۲۰۰۵) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تخمین تابع تقاضای انرژی ترکیه پرداخته و تحت سه سناریو به پیش بینی تقاضای آتی انرژی در بخش حمل‌ونقل تا سال ۲۰۲۰ پرداخته‌اند.

کارابلوت و آلکان و بیلماز<sup>۸</sup> (۲۰۰۸) در مقاله‌ای با عنوان پیش بینی تقاضای بلندمدت انرژی با استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک به تخمین و پیش بینی تقاضای انرژی الکتریکی در بخش‌های جنوب شرقی ترکیه پرداخته‌اند.

- 
- 1) Turan Paksoy
  - 2) Unler
  - 3) Canyurt And Ozturk
  - 4) Ceylan& Ozturk
  - 5) Toksari
  - 6) Ant Colony Optimization
  - 7) Woogeema,Roper
  - 8) Back-Propagation
  - 9) Haldenbilen, Ceylan

### مبانی نظری الگوریتم های ژنتیک و انبوه ذرات

امروزه با پیشرفت ابزار محاسباتی و سرعت پردازش اطلاعات زمینه پیاده سازی و حل مسائل گوناگون با استفاده از مدل های محاسبات الهام گرفته شده از طبیعت از جمله الگوریتم های تکاملی فراهم شده است. الگوریتم های تکاملی با الهام از طبیعت یک ساختار جمعیتی ایجاد کرده و بر اساس قوانینی آنها را نمو می دهند. در این روش، به هر فرد در جمعیت بر اساس تابع شایستگی و بر اساس موقعیت آن در محیط یک مقدار شایستگی نسبت داده می شود و سپس براساس قوانین معین، عملگرهای مختلف بر روی هر فرد برای ارتقا و بهبود نتیجه اعمال می گردد. اگرچه این روش از دیدگاه زیستی بسیار ساده انکارانه به نظر می رسد، اما یک سازوکار جستجوی انطباقی بسیار قدرتمند و کارا ایجاد می کند که قادر به یافتن پاسخ بهینه در بسیاری از مسائل پیچیده می باشد.

برخی مزایای الگوریتم های تکاملی عبارتند از:

- ۱- با کدینگی از مجموعه جوابها کار می کنند نه با خود آنها.
- ۲- به جای جستجوی یک جواب منفرد، دسته ای از جوابها را جستجو می کنند.
- ۳- از اطلاعات تابع هدف استفاده می کنند و نه مشتق یا اطلاعات کمی.
- ۴- از قواعد انتقال احتمالی استفاده می کنند و نه از قواعد قطعی.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در واقع شناخته شده ترین نوع از الگوریتم های تکاملی است که طی سال های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هلند<sup>۱</sup> و همکارانش ابداع و گسترش یافت. ایده محاسبات تکاملی<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ<sup>۳</sup> در کتابی با عنوان "استراتژی های تکامل" معرفی شد. تحقیقات بر روی الگوریتم ژنتیک دقیقاً پس از تحقیقات روی شبکه های عصبی مصنوعی آغاز شد که در هر دو شاخه از سیستم های بیولوژیکی به عنوان مدل انگیزشی و محاسباتی الهام گرفته شده است. این الگوریتم دارای روند تکراری بوده و در هر تکرار با یک راه حل یا چندین راه حل مختلف کار می کند.

الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه حل های اولیه تصادفی آغاز می کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، سه عملگر متفاوت تکثیر<sup>۴</sup>، جهش<sup>۵</sup> و ادغام<sup>۶</sup> به کار گرفته می شوند تا جمعیت به روز شود. هر تکرار از این سه عملگر به عنوان یک نسل شناخته می شود [۱۴].

- 1) John Holland
- 2) Evolutionary computing
- 3) Rechenberg
- 4) Reproduction
- 5) Mutation
- 6) Crossover

از آنجا که نمایش راه‌حل‌ها در الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه کروموزوم‌های طبیعی است و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک شبیه به عملگرهای ژنتیکی عمل می‌کنند، روند فوق را به نام الگوریتم ژنتیک نام‌گذاری کرده‌اند. در واقع، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند. گام اول، گروهی از نقاط جستجو را که جمعیت<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌کند. در گام دوم، بر اساس وضعیت ارزیابی شده، برخی از نقاط به عنوان کاندیداهای حل مساله انتخاب می‌شوند. در گام سوم نیز عملگرهای ژنتیک<sup>۲</sup> روی این کاندیداهای اعمال می‌شوند تا جمعیت نسل بعدی ساخته شوند. این فرآیند تا زمانی که معیارهای نهایی به دست آید، تکرار می‌شود. معیار نهایی زمانی است که نتیجه‌ای در حد قابل قبول به دست آید یا تعداد حداکثر نسل تکرار شود<sup>۳</sup>.

### الگوریتم انبوه ذرات

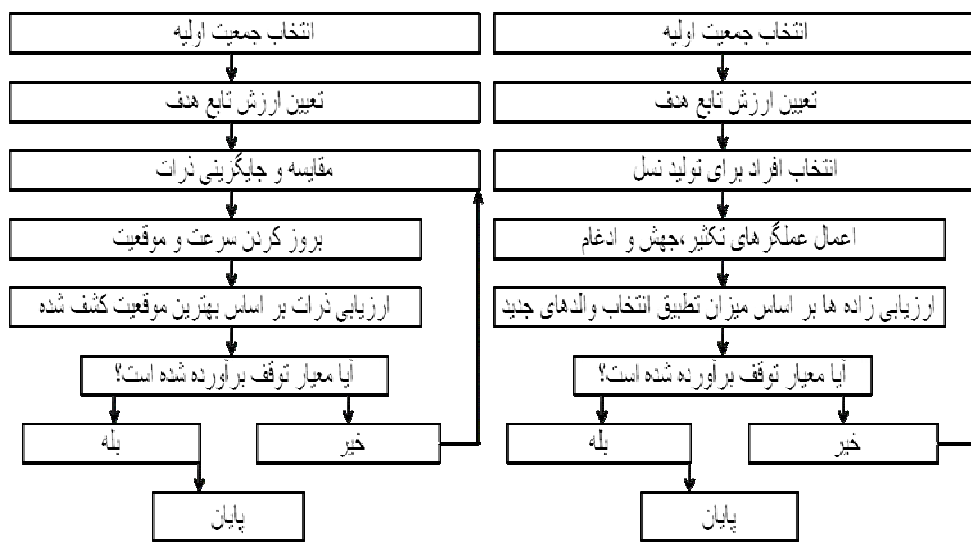
الگوریتم انبوه ذرات یک الگوریتم تکاملی<sup>۴</sup> جهت بهینه‌سازی توابع غیرخطی است که بر مبنای رفتار اجتماعی پرندگان ارائه شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت<sup>۵</sup> مطرح شد که بر گرفته از رفتار ذرات هجومی همچون دسته کلاغ‌ها بوده است؛ به این گونه که در حرکت یک دسته از کلاغ‌ها یک کلاغ (سرگروه) دارای بهترین موقعیت می‌باشد و بقیه کلاغ‌ها با توجه به موقعیت خود و کلاغ‌های مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سرگروه را دارند. در این حین، چنانچه یکی از اعضا بتواند موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند، به عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. عملکرد الگوریتم انبوه ذرات نیز به این گونه است؛ به این صورت که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مساله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه، بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع، هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است [۱۱].

نمودار جریانی مربوط به الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

- 1) Population
- 2) Genetic Operation

(۳) برای مطالعه بیشتر در مورد الگوریتم ژنتیک مراجعه کنید به: [۱۴]

- 4) Evolutionary process
- 5) Kennedy and Eberhart



شکل ۲: الگوریتم رتبه بندی ذرات

شکل ۱: الگوریتم انبوه ذرات

**تابع شایستگی (تابع هدف)**

برای بهینه یابی ضرایب الگو، پارامترها باید به نحوی تعیین شوند که مقادیر شبیه سازی شده متغیر مورد نظر بسیار نزدیک به مقادیر واقعی باشد. برای این منظور فرض کنید  $E_i^{observed}$  مقادیر واقعی تقاضای انرژی در طول دوره  $i$  و  $E_i^{simulated}$  مقادیر شبیه سازی شده توسط تابع تحت بررسی برای دوره  $i$  باشد. در این صورت با تفاضل مقادیر واقعی از مقادیر شبیه سازی شده متناظر خود خطای شبیه سازی (SE) به دست می آید، که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$SE = E_i^{observed} - E_i^{simulated} \tag{1}$$

برای شبیه سازی تابع تقاضای انرژی و یافتن ضرایب بهینه باید مجموع مجذور خطاها حداقل شود؛ چرا که در این حالت انحرافات مثبت و منفی مقادیر شبیه سازی شده از مقادیر واقعی آنها نمی توانند یکدیگر را خنثی کنند و نیز این کار باعث می شود انحرافات بزرگ نسبت به انحرافات کوچک از وزن و اهمیت بیشتری برخوردار باشند. نحوه محاسبه مجموع مجذور خطاها (SSE) در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (E_i^{observed} - E_i^{simulated})^2 \tag{2}$$

1) Simulation Error

در این مطالعه برای تخمین تابع تقاضای انرژی از رابطه (۲) به عنوان تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات استفاده شده است.

### معرفی مدل

با توجه به مطالعات و شواهد ارائه شده، تابع تقاضای انرژی را می توان به صورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

$$E=f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، E نشان دهنده کل مصرف نهایی انرژی معادل میلیون بشکه نفت خام است که از داده‌های ترازنامه انرژی استخراج شده و همچنین  $X_1$  و  $X_2$  به ترتیب نشان دهنده تعداد جمعیت، تولید ناخالص داخلی به قیمت ثابت از داده‌های بانک جهانی) و نیز  $X_3$  و  $X_4$  به ترتیب نشان دهنده صادرات و واردات کالا و خدمات معادل میلیارد ریال می‌باشند که از داده‌های سری زمانی بانک مرکزی استخراج شده‌اند.

به منظور انجام محاسبات با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات ابتدا باید داده‌ها به صورت داده‌های نرمال بین صفر و یک تبدیل شوند. برای این کار از تابع (۴) استفاده شده است.

$$X_n = (X_R - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (4)$$

در تابع فوق  $X_{min}$ ،  $X_{max}$ ،  $X_n$  و  $X_R$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر واقعی، مقادیر نرمال شده، مقادیر حداکثر و حداقل داده‌های تحت بررسی می‌باشند. مقادیر حداکثر و حداقل مربوط به متغیرهای تحت بررسی (در سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۸۶) در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقادیر حداکثر و حداقل مشاهده مربوط به متغیرهای مورد بررسی

نوع متغیر	مقدار حداقل متغیر	مقدار حداکثر متغیر
مصرف انرژی	۱۸۴/۷۵۹۲	۹۷۹/۴۲۸۷
تولید ناخالص داخلی	۱۷۲۸۰۱	۴۴۷۹۶۱
جمعیت	۳۷۲۳۷۳۰۶	۷۰۵۸۲۰۸۶
صادرات	۱۳۶۹۰	۷۹۵۸۵
واردات	۴۰۹۵۳	۱۰۲۳۳۶

منبع: نتایج تحقیق

برای برآورد تابع تقاضای انرژی از معادلات خطی و نمایی، به ترتیب از معادلات (۵) و (۶) استفاده شده است.

$$E_{Lin} = W_1 + W_2 X_1 + W_3 X_2 + W_4 X_3 + W_5 X_4 \quad (5)$$

$$E_{Exp} = W_1 + W_2 X_1^{W_2} + W_3 X_2^{W_3} + W_4 X_3^{W_4} + W_5 X_4^{W_5} \quad (۶)$$

## برآورد مدل

برای برآورد ضرائب بهینه الگوهای (۵) و (۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک تعبیه شده در نرم افزار MATLAB و برای برآورد ضرائب بهینه این الگوها با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات، از برنامه نویسی در محیط MATLAB استفاده شده است. مشخصه ها و پارامترهای بهینه الگوریتمها به صورت جداول زیر تعیین شده است؛

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد جمعیت	تابع ایجاد جمعیت	تابع انتخاب جمعیت	تابع ادغام	تابع جهش	حداکثر تکرار
۴۶	uniform	Stochastic uniform	Scattered	Adaptive feasible	۱۰۰ بار

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم انبوه ذرات

تعداد جمعیت	پارامتر شناخت فردی	پارامتر شناخت اجتماعی	ضریب اینترسی	حداکثر تکرار
۴۶	۱/۳	۲/۷	۰/۶۶	۱۰۰ بار

با استفاده از داده های سال های ۱۳۵۹ تا ۱۳۸۲، معادلات مربوط به هر یک از الگوهای خطی و نمایی حاصل از الگوریتم های مورد بررسی به صورت زیر برآورد شده است.  
معادله خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک؛

$$E_{Lin}^{GA} = -0.345 + 0.2743X_1 + 0.6656X_2 + 0.438X_3 + 0.016X_4 \quad (۱۱)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک؛

$$E_{Exp}^{GA} = -0.129 + 0.1492X_1^{0.7297} + 0.7632X_2^{1.2551} + 0.927X_3^{1.1179} - 0.294X_4^{0.9681} \quad (۱۲)$$

معادله خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات؛

$$E_{Lin}^{PSO} = -0.345 + 0.2741X_1 + 0.6656X_2 + 0.439X_3 + 0.016X_4 \quad (۱۳)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات؛

$$E_{Exp}^{PSO} = -0.05 + 0.1218X_1^{0.7268} + 0.7917X_2^{1.4484} + 0.618X_3^{0.7386} - 0.623X_4^{0.062} \quad (۱۴)$$

### ارزیابی الگوها در شبیه سازی

پس از تخمین ضرائب مربوط به هر یک از الگوهای مورد بررسی، با توجه به این نکته که داده‌ها به اعداد نرمال بین صفر و یک تبدیل شده‌اند، ابتدا مقادیر برآورد شده به مقادیر واقعی تبدیل می‌شوند و سپس با استفاده از مقادیر واقعی کارایی هر یک از الگوها در شبیه سازی روند تقاضای انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای تبدیل مقادیر نرمال برآورد شده به مقادیر واقعی از تابع (۱۵) استفاده شده است.

$$X = X_n * (X_{max} - X_{min}) + X_{min} \quad (15)$$

برای ارزیابی کارایی شبیه‌سازی معمولاً از معیارهای خطای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در این مطالعه از معیار میانگین مجذور خطا<sup>۱</sup> و میانگین قدرمطلق درصد خطا<sup>۲</sup> به عنوان معیار ارزیابی کارایی شبیه‌سازی استفاده شده است. جدول (۴) نتایج ارزیابی کارایی هر یک از الگوهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول (۴): نتایج ارزیابی کارایی الگوهای تحت بررسی

$E_{Exp}^{PSO}$	$E_{Lin}^{PSO}$	$E_{Exp}^{GA}$	$E_{Lin}^{GA}$	الگوی استفاده شده
۲۰۲/۱۷۱۱	۵۲۱/۹۵۱۹	۲۵۷/۴۰۴۸	۵۲۱/۹۵۲۰	MSE
۰/۰۱۲۰۲۷	۰/۰۱۹۱۸۸	۰/۰۱۴۲۸۹	۰/۰۱۹۱۸۶	MAPE
۰/۹۹۵۸	۰/۹۸۹۱	۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۹۱	درصد دقت پیش‌بینی

منبع: یافته‌های محقق

همان گونه که مشاهده می‌شود، کلیه معیارها نشان دهنده برتری الگوی نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات می‌باشد، با این حال، تفاوت محسوسی بین الگوهای خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات

$$1) \text{ Mean Squared Error} \quad \text{MSE} = \frac{\sum_{T+1}^{T+m} (Y_t^e - Y_t)^2}{m}$$

$$2) \text{ Mean Absolute Percentage Error} \quad \text{MAPE} = \frac{100 \sum_{T+1}^{T+m} \left| \frac{Y_t^e - Y_t}{Y_t} \right|}{m}$$

در توابع فوق  $Y_t^e$  و  $Y_t$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر واقعی و مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشند.

مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر، سهولت دستیابی هر دو الگوریتم به نقاط بهینه در توابع خطی بوده است. اما چنانچه ملاحظه می‌شود، به دلیل اینکه متغیرهای مسأله دارای الگوی رشد نمایی بوده‌اند، نتایج هر دو الگوریتم در الگوی نمایی بهتر از الگوی خطی بوده است. همچنین در برآورد تابع غیرخطی (الگوی نمایی) الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتم انبوه ذرات به دلیل همگرایی کندتر در حداکثر ۱۰۰ تکرار، نتایج بهتری ارائه نمی‌کند.

### پیش‌بینی تقاضای انرژی

انرژی نقش مهمی در رشد و توسعه جوامع داشته و به عنوان یکی از عوامل تولید به اشکال مختلف در فرایند تولید اثرگذار است. از این رو، تخمین و شبیه‌سازی روند مصرف و همچنین پیش‌بینی روند آتی آن، اهمیت فراوانی در سیاست‌گذاری‌های اقتصادی و انرژی دارد. بنابراین، بکارگیری روش‌هایی که بتواند با دقت بالایی اهداف فوق را برآورد نماید، مورد علاقه سیاست‌گذاران و محققینی است که درگیر با مسائل تامین انرژی می‌باشند. لذا در این مطالعه پس از شبیه‌سازی روند تقاضای انرژی کشور در قالب الگوهای خطی و نمایی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات، کارایی آنها در پیش‌بینی روند آتی تقاضای انرژی بررسی شده است تا کاراترین الگوی تقاضای انرژی کشور پیش‌بینی گردد. بدین منظور پس از ارزیابی کارایی الگوهای مختلف، روند آتی متغیرهای مستقل با استفاده از روش سناریو سازی پیش‌بینی شده و در نهایت بر اساس آن، تقاضای انرژی تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی می‌گردد.

### ارزیابی الگوها در پیش‌بینی

به منظور ارزیابی الگوها در پیش‌بینی از معیار اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده تقاضا و مقادیر تقاضای واقعی خارج از دامنه تخمین استفاده می‌شود. لذا از داده‌های سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ که در دسترس بوده به عنوان مبنای معیار ارزیابی کارایی پیش‌بینی استفاده و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج ارزیابی کارایی پیش‌بینی الگوهای تحت بررسی

معیار ارزیابی		سال				روش پیش‌بینی
		۱۳۸۶	۱۳۸۵	۱۳۸۴	۱۳۸۳	
MAPE	MSE	۹۷۹/۴۳	۹۱۴/۷۴	۸۴۰/۰۹	۷۷۶/۴۱	مقادیر واقعی
		۹۳۹/۶۹	۸۸۶/۸۱	۸۴۲/۱۳	۷۹۷/۰۷	پیش‌بینی الگوی $E_{Lin}^{ga}$
-۰/۰۲۳۰۶۶	۶۹۷/۵۵	۳۹/۷۳۸	۲۷/۹۲۹	-۲/۰۳۷۵	-۲۰/۶۶۱	خطای برآورد
		۹۶۷/۴	۹۰۲/۵۶	۸۴۹/۳۷	۷۹۵/۲۶	پیش‌بینی الگوی $E_{Exp}^{ga}$
-۰/۰۱۳۴	۱۸۳/۵۷	۱۲۰/۲۴	۱۲/۱۸۶	-۹/۲۸۳۷	-۱۸/۸۴۱	خطای برآورد
		۹۳۹/۶۹	۸۸۶/۸۲	۸۴۲/۱۳	۷۹۷/۰۷	پیش‌بینی الگوی $E_{Lin}^{pso}$
-۰/۰۲۳۰۶۱	۶۹۷/۴۲	۳۹/۷۳۸	۲۷/۹۲۶	-۲/۰۳۵۵	-۲۰/۶۵۴	خطای برآورد
		۹۷۷/۴۵	۹۰۵/۲۴	۸۴۷/۸۵	۷۸۸/۸	پیش‌بینی الگوی $E_{Exo}^{pso}$
-۰/۰۰۸۱	۷۶/۹۸	۱/۷۹۸۶	۹/۵۰۵۱	-۷/۷۵۵۴	-۱۲/۳۹	خطای برآورد

منبع: یافته‌های محقق

نتایج بدست آمده نشان دهنده قدرت بالای پیش بینی الگوی نمایی با کمترین میزان میانگین قدرمطلق درصد خطا در هر دو حالت استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات بوده و از میان حالت‌های فوق الگوی نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات با داشتن حداقل میانگین مجذور خطا و میانگین قدر مطلق درصد خطا، بهترین حالت برای پیش‌بینی روند آتی تقاضای انرژی کشور می‌باشد. این نتایج دور از انتظار نبوده است، چرا که در فرایند شبیه‌سازی نیز الگوی نمایی شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات دارای عملکرد بهتری بوده است.

### سناریوسازی

پس از مقایسه کارایی هر روش در پیش‌بینی مقادیر آتی تقاضای انرژی و تشخیص بهترین الگو، با تدوین سناریوهای مختلف برای روند متغیرهای مستقل می‌توان روند آتی تقاضای انرژی را با توجه به آن پیش‌بینی کرد. روش سناریوسازی یکی از روش‌های کیفی آینده‌نگری است که بر طبق آن به ترسیم و تصور آینده با طراحی سناریوهای فرضی می‌پردازیم. سناریوها تصویر روشنی از آینده‌اند که برنامه‌ریزی به کمک آنها می‌تواند مسائل، چالش‌ها و فرصت‌های محیط را به روشنی ببیند و بشناسد. سناریو، ابزاری برای تحلیل سیاست‌ها و شناخت شرایط، تهدیدات، فرصت‌ها، نیازها و ارزش‌های برتر آینده است. به سبب گوناگونی عوامل و نیروهای سازنده آینده و پیچیدگی و تعامل میان آنها، هرگز نمی‌توان آینده را به طور دقیق پیش‌بینی کرد. از این رو، متخصصان آینده‌نگری، انتخاب محتمل‌ترین تصویر آینده را چندان درست نمی‌دانند. در نتیجه، باید سناریوهای مختلفی را برای برنامه‌ریزی به کار برد. بنابراین، اگر سناریو شامل همه تصاویر ممکن آینده باشد، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی به شمار آید. چنان‌که با بهره‌برداری روش تأثیرات متقابل و بکارگیری این سناریو، به خوبی می‌توان به استقبال آینده رفت [۱]. از این رو، در این مطالعه به منظور پیش‌بینی تقاضای بلندمدت انرژی سه سناریوی احتمالی برای متغیرهای مستقل در نظر گرفته و سپس براساس آنها مقادیر آتی تقاضای بلندمدت انرژی پیش‌بینی می‌گردد. سناریوهای مورد نظر در جدول (۶) ارائه شده است.

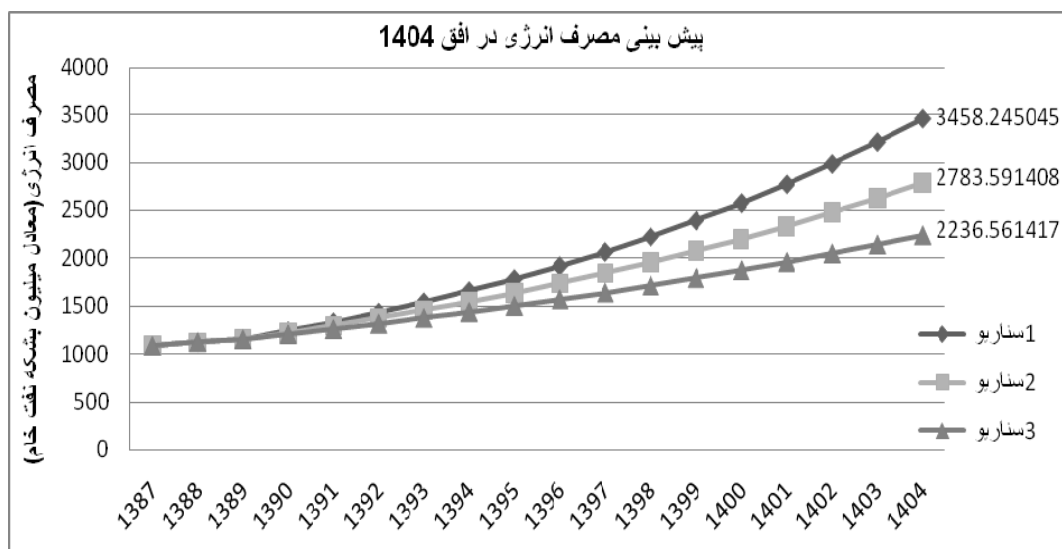
جدول ۶: سناریوسازی رشد متغیرهای توضیحی (درصد) در افق سند چشم‌انداز ۱۴۰۴

سناریو	جمعیت	تولید ناخالص داخلی	صادرات کالا و خدمات	واردات کالا و خدمات
۱	۱/۵	۵	۵	۶
۲	۱/۲۵	۴	۴	۵
۳	۱	۳	۳	۴

### پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی

با توجه به سناریوهای تدوین شده برای متغیرهای مستقل مورد استفاده و با استفاده از الگوی نمایی برآورد شده توسط الگوریتم انبوه ذرات به عنوان بهترین روش برآورد، روند مصرف انرژی در کشور تا پایان سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی و نتایج آن در نمودار ۱ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن بحران اقتصادی اخیر و همچنین تشدید تحریم‌ها علیه ایران، سناریوی سوم یک حالت بدبینانه در زمینه رشد متغیرهای مستقل الگو را ارائه می‌کند. با توجه به این سناریو، الگوی نمایی برآورد شده با الگوریتم انبوه ذرات پیش‌بینی می‌کند مصرف انرژی در سال ۱۴۰۴، افق سند چشم‌انداز کشور، برابر با ۲۲۳۶ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود. از سوی دیگر، سناریوی اول با یک خوشبینی نسبت روند رشد متغیرهای مستقل الگو و در نظر گرفتن بهبود روابط خارجی و کاهش تحریم‌ها علیه کشور و نیز اجرای برنامه‌های جمعیتی موفق جهت جلوگیری از کاهش نرخ رشد جمعیت، برآوردی بیش از دو سناریوی دیگر را نشان داده و مصرف انرژی کشور را در افق ۱۴۰۴ برابر با ۳۴۵۸ میلیون بشکه معادل نفت خام پیش‌بینی می‌کند. سناریوی دوم نشان‌دهنده یک حالت بینابین دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه است. این سناریو با در نظر گرفتن توفیق نسبی در اهداف سند چشم‌انداز یک رویکرد نسبتاً متوسط را در قبال رشد متغیرهای مستقل الگو ارائه می‌کند. لذا با توجه به این سناریو، میزان مصرف انرژی در کشور در سال ۱۴۰۴ برابر با ۲۷۸۳ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود. نتایج پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی کشور بر اساس سناریوهای مذکور در نمودار ۱ ارائه شده است.



منبع: یافته‌های محقق

نمودار ۱: پیش‌بینی تقاضای انرژی

### نتیجه‌گیری

امروزه انرژی فراوانی در توسعه جوامع داشته و در تمام بخش‌های اقتصاد در فرایند تولید نقش اساسی دارد. لذا تامین کافی و به هنگام انرژی مورد نیاز کشور یکی از اهداف برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران هر کشوری می‌باشد. در این

راستا، اطلاع از روند آتی تقاضای انرژی و پیش بینی میزان مصرف آتی آن نقش اساسی در تامین اهداف فوق دارد. از طرف دیگر، با پیشرفت‌هایی که در زمینه فناوری و محاسبات رایانه‌ای انجام شده است، روش‌های فرا ابتکاری و ملهم از طبیعت برای محاسبات و پیش‌بینی جایگاه خاصی یافته‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات از جمله این روش‌های نوین محاسباتی می‌باشند.

در این مطالعه، کارایی الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات در تخمین و پیش‌بینی روند آتی مصرف انرژی کشور در قالب دو الگوی نمایی و خطی مورد بررسی قرار گرفته و روند آتی تقاضای انرژی تحت سه سناریو در افق چشم انداز ۱۴۰۴ مورد پیش‌بینی قرار گرفته است.

نتایج مقایسه الگوهای برآورد شده در این مطالعه با دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک به شرح زیر است:

- ۱- کارایی الگوهای خطی برآورد شده به وسیله هر دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک تقریباً یکسان است. دلیل این امر سهولت دستیابی به پاسخ‌های بهینه توسط هر دو الگوریتم مورد استفاده در مقاله بوده است.
- ۲- الگوی نمایی برآورد شده در مقایسه با الگوی خطی در هر دو الگوریتم انبوه‌ذرات و ژنتیک کارایی بیشتر داشته و نتایج دقیق‌تر را منجر می‌شوند. دلیل این امر نیز پیروی روند رشد متغیرهای مورد استفاده از الگوی رشد نمایی بوده است.
- ۳- مدل نمایی برآورد شده توسط الگوریتم انبوه‌ذرات در مقایسه با مدل نمایی برآورد شده توسط الگوریتم ژنتیک کارایی بیشتری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی دارد. دلیل این امر همگرایی سریعتر الگوریتم انبوه ذرات در دستیابی به پاسخ‌های بهینه بوده است.

شایان ذکر است که پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی با استفاده از الگوی نمایی برآورد شده توسط الگوریتم انبوه ذرات به عنوان الگوی برتر بر اساس ۳ سناریوی بدبینانه، بینابین و خوشبینانه برای متغیرهای مستقل نشان داد که تقاضای انرژی در ایران در سال ۱۴۰۴ در حالت بدبینانه، بینابین و خوشبینانه به ترتیب برابر با ۲۲۳۶، ۲۷۸۳ و ۳۴۵۸ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود.

بر اساس یافته‌های این مطالعه، پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی از الگوی نمایی و الگوریتم انبوه ذرات برای پیش‌بینی تقاضای انرژی کشور به تفکیک بخش‌های اقتصادی استفاده گردد و نیز کارایی این الگوریتم با سایر روش‌های محاسبات ملهم از طبیعت مقایسه گردد.

## منابع

- [۱] بانک اطلاعات سری های زمانی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (<http://tsd.cbi.ir>)
- [۲] بزرگی، محمدرضا. (۱۳۸۸)، روش های پژوهش در حوزه آینده اندیشی، مجله کتاب ماه علوم اجتماعی، ۱۴، صص ۱۴-۱۹.
- [۳] صادقی، حسین. ذوالفقاری، مهدی. (۱۳۸۸)، تخمین تابع تقاضای بنزین در بخش حمل و نقل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، فصل نامه مطالعات انرژی، شماره ۲۱، صص ۱ تا ۲۷.
- [۴] فرج زاده ده کردی، حسن. (۱۳۸۶)، کاربرد الگوریتم ژنتیک در مدل بندی پیش بینی ورشکستگی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد حسابداری دانشگاه تربیت مدرس.
- [۵] قنبری، علی. خضری، محسن. اعظمی، آرش. (۱۳۸۷)، شبیه سازی تقاضای بنزین و نفت گاز در حمل و نقل زمینی ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک، فصلنامه اقتصاد مقداری، شماره ۴، صص ۱۵۷ تا ۱۷۷.
- [۶] میبیدی، علی. خضری، محسن. اعظمی، آرش. (۱۳۸۸)، شبیه سازی تابع تقاضای انرژی در ایران با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات، فصل نامه مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۲۰، صص ۱۵۹ تا ۱۴۱.
- [۷] عیوضی، وزارت نیرو، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، ترازنامه های انرژی (<http://pep.moe.org.ir>).
- [8] Assareh E. Behrang M.A. Assari M.R. Ghanbarzadeh A. 2010, "Application of PSO (Particle Swarm Optimization) and GA (Genetic Algorithm) Techniques on Demand Estimation of Oil In Iran", Energy, Vol. 35, pp. 5223-5229.
- [9] Canyurt O.E. Ozturk H.K. 2006. "Three Different Applications of Genetic Algorithm (GA) Search techniques on Oil Demand Estimation". Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 3138-3148.
- [10] Ceylan H. Ozturk H.K. 2004. "Estimating Energy Demand of Turkey Based on Economic Indicators Using Genetic Algorithm Approach". Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 2525-2537.
- [11] Clerc M. 2006, "Particle Swarm Optimization", london, British Library Cataloguing-in-Publication Data, UK.
- [12] Ebrahimi K. 2010, "Modeling And Forecasting Ling-Term Natural Gas(NG) Consumption In Iran, Using Particle Swarm Optimization(PSO)", Master Thesis Computer Engineering , Hogskolan Dalarna, Swedish.
- [13] Haldenbilen S. Ceylan H. 2005. "Genetic Algorithm Approach to Estimate Transport Energy Demand in Turkey", Energy Policy, Vol. 33, pp. 89-98.
- [14] Haupt R.L. Haupt S.E. 2006, "Practical genetic algorithms", Hoboken, New Jersey, A Wiley-Interscience publication.
- [15] Karabulut K. Alkanb A. Yilmaz A. 2008. "LONG TERM ENERGY CONSUMPTION FORECASTING USING GENETIC PROGRAMMING", Mathematical And Computational Applications, Vol. 13, pp. 71-80.

- 
- [16] Paksoy T. Özceylan E. Pehlivan N. Weber G. 2011. "Particle Swarm Optimization Approach For Estimation Of Energy Demand Of Turkey", Global Conference On Power Control And Optimization, Dubai, UAE.
- [17] Toksar M. 2007. "Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey", Energy Policy, Vol. 35, pp. 3984–3990.
- [18] Unler, A. 2008. "Improvement Of Energy Demand Forecasts Using Swarm Intelligence: The Case Of Turkey With Projections To 2025". Energy Policy, Vol. 36, pp. 1937-1944.
- [19] Woogeema Z. Williams R. 2009. "Energy Demand Estimation Of South Korea Using Artificial Neural Network", Energy Policy, Vol. 37, pp. 4049–4054.
- [20] World bank database(<http://data.worldbank.org>).